

平成 22 年 5 月 24 日現在

研究種目：若手研究(B)
研究期間：2007～2009
課題番号：19760342
研究課題名（和文）河床生物膜の形成過程・浄化能に及ぼす河川構造物周辺の流れの影響に関する研究
研究課題名（英文）Study on flow effect on bio-film production around river structures

研究代表者
門田 章宏 (KADOTA AKIHIRO)
愛媛大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：80294784

研究成果の概要（和文）：河川構造物に形成される生物膜を対象に、それに及ぼす構造物材質や周辺での河川環境が及ぼす影響として、微生物膜形成場としてのコンクリート表面の材質を変化させたときの、コンクリート表面上での流れの影響を解明するための流れの可視化手法の開発実験を行った。

研究成果の概要（英文）：For the biofilm formed on river structures, as the effects of materials of the structures and the surrounding environments, detail flow structures on the different concrete surface of river works are measured experimentally and studied by means of flow visualization technique.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,800,000	0	1,800,000
2008 年度	700,000	210,000	910,000
2009 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	450,000	3,750,000

研究分野：開水路乱流

科研費の分科・細目：土木工学・水工水理学

キーワード：流体力学

1. 研究開始当初の背景

流況を詳細に把握する手段として、これまで流体力学や河川工学の分野では、流れ現象の数理モデル開発に加え、可視化技術など最新の測定技術開発・適用が試みられてきており、成果も報告されつつある。一方、水環境工学分野における生物膜のような微生物増殖・反応が加わる現象に対しては、現象が複雑になりすぎ、一部で数理モデル開発はされるものの、その記述は簡易なものであり、ま

たこの分野の研究は生物反応を中心とした研究がこれまでほとんどであった。また実験による種々の知見は得ているものの、詳細な流れ現象を詳細に解明するまでには至っておらず、流体・河川工学分野での最新の研究成果の適用が重要と認識されつつある。

2. 研究の目的

近年、自然石や木材を用いた水制・帯工などが用いられているにもかかわらず、河川に

ある構造物の多くはコンクリート材で造られている。この様なコンクリート構造物利用の多様化の状況から、水環境においてもコンクリート構造物に対する生態系の造成が試みられ、河川の自浄作用に着目し、コンクリート構造物への生物付着促進のための技術開発・適用が試みられている。

本研究では、これらの河川構造物周辺の流況を詳細に把握し、その上で種々の河川環境因子が、生物膜の形成・維持に及ぼす影響を的確にかつ詳細に評価することを目的とする。



写真-1 水路とその周辺の装置

3. 研究の方法

河川水の自浄作用を促すコンクリート担体からなる河川構造物の縮小モデルを対象とし、瞬間的流れの可視化実験について、最新の流速測定法である粒子画像流速測定法 (Particle Tracking Velocimetry 法) を用いて、河川構造物周りの流れを的確にかつ詳細に把握し、生物付着特性と生物膜形成・剥離特性等の解析に適用する。

まず、ラボスケールの模擬実験水路の作成を行う。水路はアクリル製の循環式水路であり、循環水の安定供給のための貯水槽に、非接液型電磁式流量センサを通して塩化ビニル管で作成した2本のサイフォンを渡し、マグネットポンプで水路に返送するシステムになっている。水路系は長さ約2m、幅10cm、高さ20cmのスケールを設定し作成する。これらの水路システムの作成の後、河川構造物モデルとして、粗骨材、細骨材等のいくつかのコンクリート担体を設置し、所定の条件で通水した後、流れの様子を高精度カメラで撮影・観察する。写真-1には実際に作成した水路と周辺装置の様子を示している。また、可視化画像の撮影にあたってはデジタルハイスピードカメラとフレームグラバ (画像処

理ボード) および撮影・解析用コンピュータに増設することで、コンクリート表面の流れを精度良く捉える。また、これらの可視化画像システムの設置と並行して解析コードの開発を行う。解析コードの開発にあたっては、河川構造物の代表例である水制や円柱橋脚を使って検証を行う。

次に、実際に形成した生物膜の表面における可視化実験を行い、生物膜が剥離される条件を、上述で行った流れの可視化実験から得られた流れの情報をもとに判別を行った。この実験では水路内に人工下水を流入・循環させ、人工ゼオライト混入率を変化させることによって生物膜を形成させ、剥離状況等の状態を水質分析を行うことで明らかにし、流れ (特に流量、せん断応力) との関係を明らかにする。

さらに、実際の現場に適用できるものとして河川構造物の代表例として水制を取り上げ、水制構造物の素材として石かごなどをポーラス状の素材として適用し、このような水制周辺の流れや周辺環境への影響について考える。また、これまでの様々な流れの可視化実験で開発してきたFFT相互相関法と直接相互相関法を併用する広域平面場を精度良く計測できる手法を適用することを考える。また、実際にあるこれらの河川構造物は様々な形状からなる複雑な構造である。そのため、これらに着目した実験を行うことを目的とし、現存する様々な水制形状の表面やその周辺近傍に発生する組織的流れや乱流統計量ならびに水制背後に発生するせん断応力を評価することを行い、流れと周辺環境への影響の評価を行う。

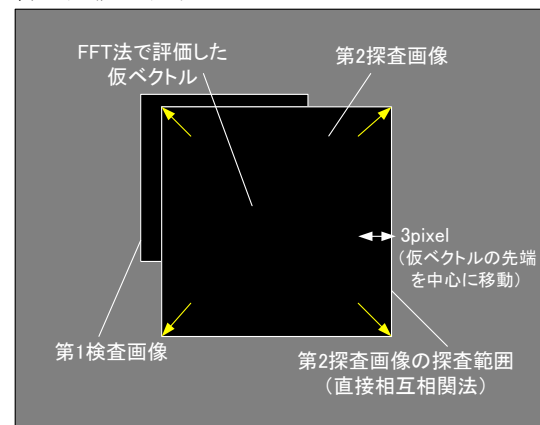


図-1 FFT法と直接相関法を合わせたPTV解析

4. 研究成果

(1) 河川構造物周辺の流れの可視化画像の解析手法の開発

様々な粒子画像流速測定法の中でも、3次元ヴォリューム内の3成分流速ベクトルへの応用が期待できるとして最近注目されている手法が、個々の粒子あるいは周囲粒子の組

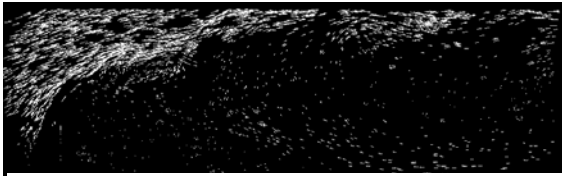


図-2(a) 水制先端付近非越流時の流速ベクトル分布

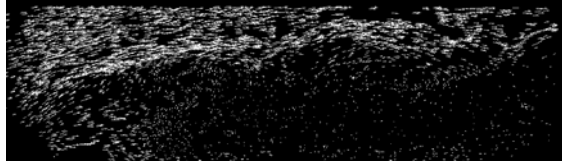


図-2(b) 水制先端付近非越流時の流速ベクトル分布

み合わせを追跡し流速ベクトルを評価する PTV 法である。また、PTV 法は水制周辺の流れのように主流・死水域間の流速差の大きな流れ場にも適用できる。本解析では、浅水流を対象とした 2 次元 PTV 法 (SPTV) として、従来から PTV 法で用いられている FFT 相互相関法と直接相互相関法のそれぞれの利点を組み合わせ、それぞれの欠点を補う手法を考え開発した。具体的には、FFT 相互相関法のみを用いた場合、高速な計算は可能であるが、相関領域が 4 の倍数 (16, 32 ピクセルなど) に限られ、領域の 1/4 を超える移動が生じた場合は誤ベクトルの確率が高くなる。また、直接相互相関法を用いた場合は、精度は良いものの探查領域サイズを決定するのに不確実性があることと長時間の計算が必要となる。そこで本解析では、図-1 に示すようにまず FFT 相互相関法によって精度のやや低い仮ベクトルを評価し、このベクトルの先端を中心に上下左右 3 ピクセルだけ移動させた探查領域を新たに設定し直接相互相関法に適用する手法を考えた。この手法によって、広範囲の個々のベクトルに対して 49 回のみでの探查で精度を保ちつつ高速計算を可能にした。この他、サブピクセル解析、画像処理として解析前に全画像の平均画像を個々の時系列画像から引くことにより背景・ノイズ除去を行った。上述の解析手順に従って評価した瞬間流速ベクトルの結果を図-2 に示している。水面が水制高さより下にある非越流状態 (a) では、水制先端からの剥離によって強いせん断層が形成されるのに対し、越流状態 (b) の流れは水制上部を流れる越流からの段落ち流れによって主流と水制直下流部の低速域との速度差が弱くなるといった傾向がこの解析手法によって的確に捉えられている。

次に、SPTV 法によって得られた瞬間流速ベクトルを等間隔メッシュ上に補間し、この補間データを用いて平均流速やその他の乱れ変動量に関する平均流統計解析を行った。

図-3 は、乱流統計量解析結果の一例として、水制構造物表面付近の乱れ強度やレイノルズ応力分布を示している。これら緒量は、生物膜の形成剥離に及ぼす指標と考えられる。

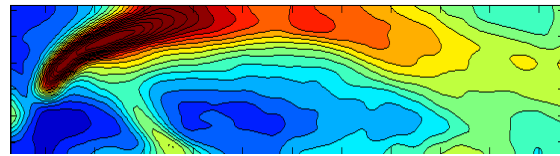


図-3(a) 乱れ強度の主流方向成分 u_{rms} (cm/s)

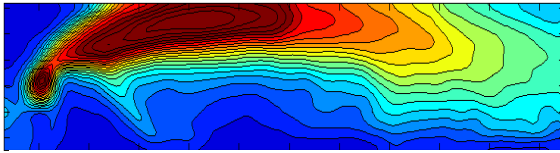


図-3(b) 乱れ強度の横断方向成分 w_{rms} (cm/s)

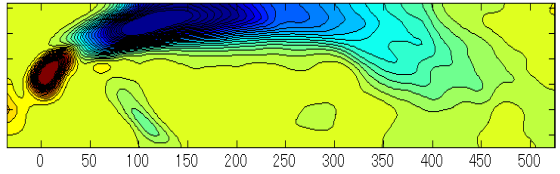


図-3(c) レイノルズ応力 $-uw$ (cm²/s²)

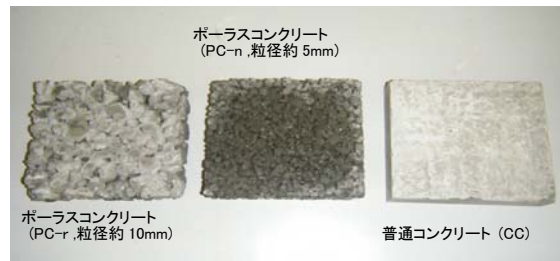


図-4 本実験で用いた三種類の供試体

(2) 生物膜形成場におけるポーラスコンクリート表面の流れの可視化実験およびせん断応力の評価

上述の可視化画像解析手法および実験法を用いて、生物膜形成場となるポーラスコンクリート表面の流れの解析を行う。この実験では、循環式直線開水路 (長さ 2m, 幅 10cm, 高さ 20cm) に、粒径を変化させたポーラスコンクリートを設置し、デジタルハイスピードカメラを用いて、可視化実験を行った。また、光源としてメタルハライドファイバー照明装置を用い、2~3mm のスリット光を発生させた。流量調節は、アンプ分離型電磁式デジタル流量センサ (KEYENCE FD-MA500A) により行った。実験条件に関しては、上述の装置を用いて図-4 に示すように 3 種類の供試体 (10cm×10cm) をそれぞれ用いて水路床に敷き詰め、断面平均流速 20, 40, 60 (cm/s) の計 9 つの実験条件下で可視化実験を行い、これらのコンクリート担体周辺の粒子画像を追跡する手段として、前節で開発した SPTV 法を採用した。

実験結果の一例として断面平均流速 40 (cm/s) の水平断面内の Reynolds 応力 (cm²/s²) の分布を、二つの供試体 (粒径 10mm のポーラスコンクリートおよび普通コンクリート) についてそれぞれ図-5 に示している。

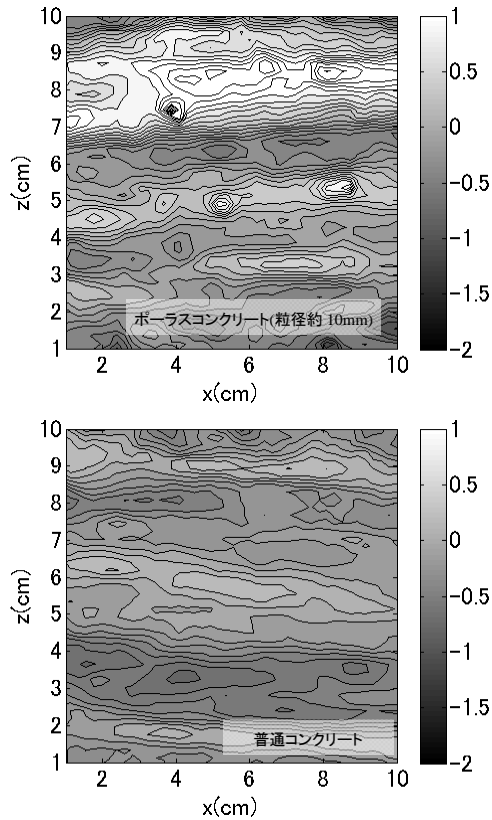


図-5 供試体表面の Reynolds 応力横断方向成分

ポーラス空隙からの横断方向への運動量輸送が活発に行われていることが推測される。供試体のポーラス形状による顕著な違いが観られ、ポーラス間で発生する巻き上げによってもたらされたものと考えられる。粒径が大きくなるほど、空隙間とその外部の流れによる流速差でせん断が強く傾向が現れており、さらに、粗面乱流に観察される縞構造が発生し、ポーラスの粗度に応じて大きくなるといえる。これらの乱流統計量を指標にすることによって、どの様な水理条件下で生物膜が形成することができるかを定量的に把握することが可能と考えられる。

次に、瞬間的にどのような乱れ変動が起きているかを把握するために POD 解析を行った。図-6 に解析結果の一例を示している。これらの水平断面内の POD 抽出パターンにおいて交互に正負の主流方向の瞬間的乱れ変動が生じ縞模様の構造が観られる。また、上述の Reynolds 応力などの平均的乱れ変動量と同様に強いせん断が観られる粒径の粗いポーラスコンクリート表面に大きなスケールの変動パターンが観られる。これらの POD 解析結果は、瞬間的に起きる時間スケールの極小さな生物膜の剥離現象解明に有効であると考えられる。

(3) 実存する河川構造物周辺の流れに関する検討

実存する河川構造物は、石かご等のポーラ

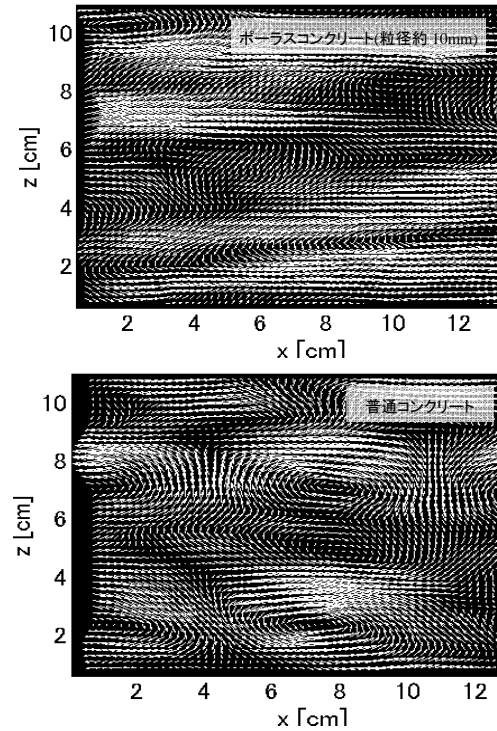


図-6 POD 解析による特徴的な乱れ変動パターン

ス状の水制や護岸等があり、特に水制構造物については様々な形状をもった水制がある。前節までは、これら河川構造物の表面の材質がどの様に流れへの影響を与えるかについて検討を行ったが、次のステップとしては実存する河川構造物の形状を模擬した流れの検討を行っている。主な結果として、図-7 に示すようにの様々な形状によって河川構造物付近で大きく流れの変化が生じていることが分かっている。

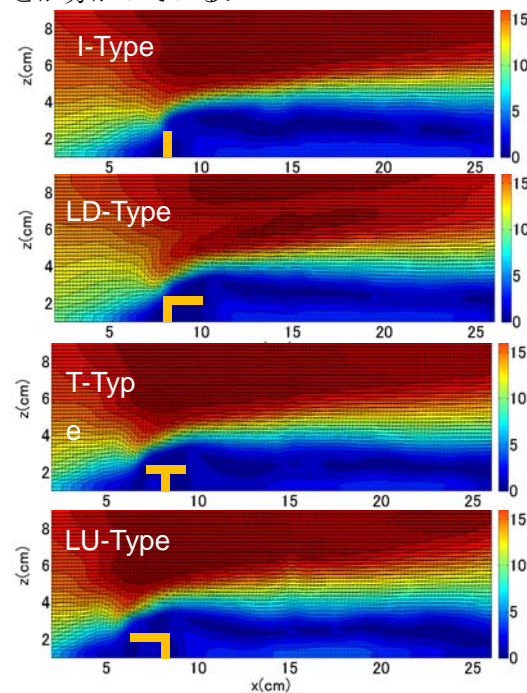


図-7 各種形状を持つ河川構造物周辺の流れ

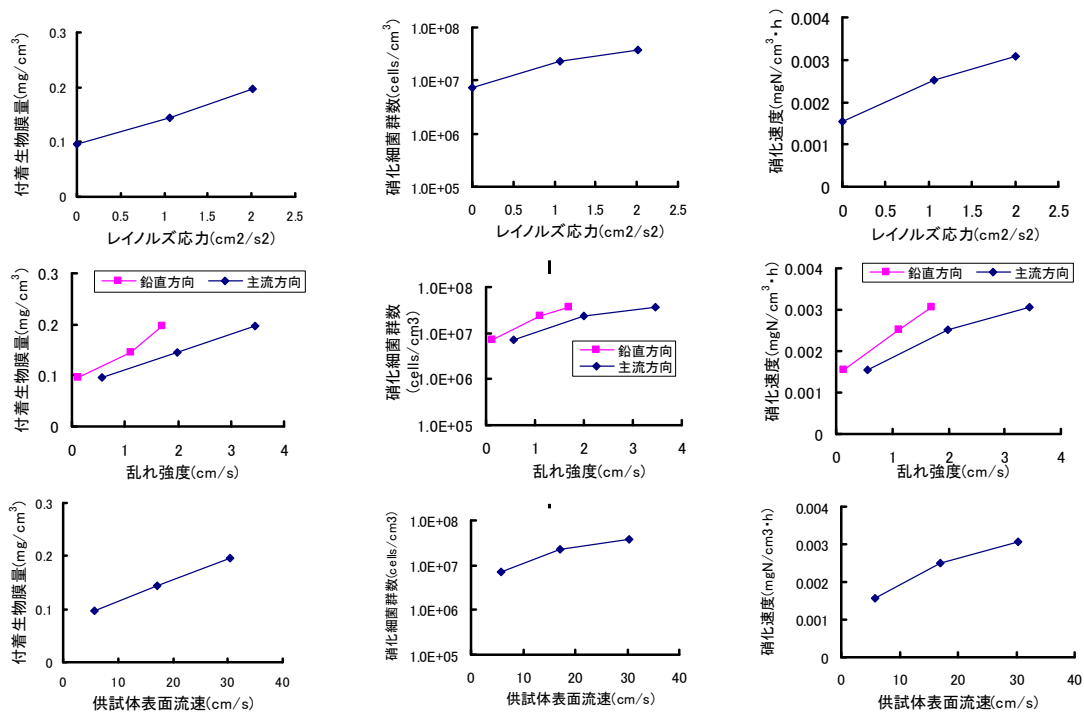


図-8 生物膜附着および硝化活性と平均流特性との関係

(4) ポーラスコンクリートによる水質浄化効果に関する検討

写真-1 に示した模擬汚濁水を連続流入させているポーラスコンクリート敷設水路で流れの可視化実験を実施した時点で、附着していた生物膜量を測定し、その活性とコンクリート表面でのレイノルズ応力などの流れ特性との関係を調べた。図-8 に生物膜附着および硝化活性に及ぼす平均流特性との関係を示す。生物膜が附着するポーラスコンクリート表面でのレイノルズ応力、乱れ強度(主流方向成分、鉛直方向成分)、コンクリート表面流速に関して示す。コンクリート担体表面での乱れによる剪断応力、乱れ強度が増加するに従い、単位担体あたりの生物膜付着量、硝化細菌群数および硝化活性が高まることわかった。流速が速くなるとポーラスコンクリート表面への生物膜附着が増加するには、乱れの影響が関係していることが示された。

生物膜はコンクリート表面部や空隙部に附着するが、それらの部分や附着している生物膜と液が接触する面が重要となってくる。生物膜と液の接触面での乱れ強度や乱れによる剪断応力の増加が、生物膜附着促進に影響を与えているであろう。水中で、乱れが存在するのとしらないのでは、物質移動においては大きな差があると考えられ、乱れが生じることにより物質の移動を大きく促進する作用があると思われる。生物膜の増殖初期で、硝化細菌群は数日で担体に附着されていた。流速が速くなり、乱れが大きくなることで、担体表面での剪断応力が強くなり、表面に付

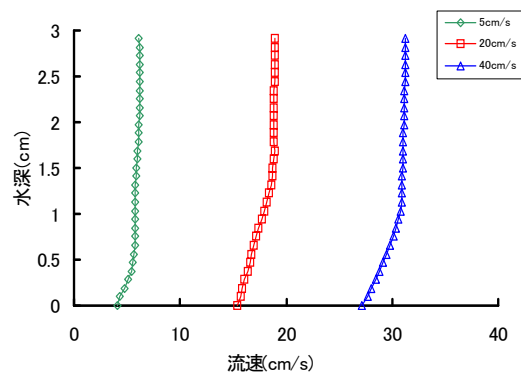


図-9 鉛直断面の流速分布

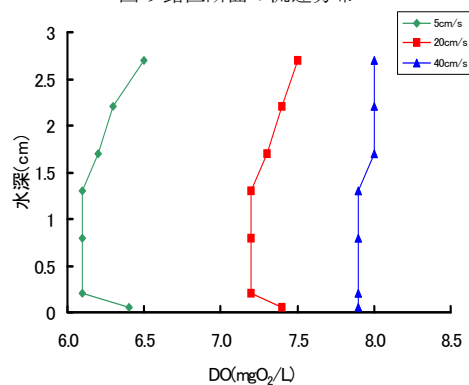


図-10 鉛直方向の溶存酸素濃度

着する硝化細菌へのアンモニアや溶存酸素の供給が促進されたため、附着性能が高まったと推察される。

また、図-9 にコンクリート担体上流端から $x=3\sim 4\text{cm}$ 断面内の平均を取った鉛直方向の流速の分布を示す。参考として図-10 には、

鉛直方向のDOを示す。DOは、可視化実験では求められないので接触方式ではあるが、ポイントゲージにDO計を取り付けたものによりDOを測定した。流速が増加するにつれDOも増加していることがわかる。流速の最も速いケースでの水深0.2cm部分のDOは7.9(mgO₂/L)であり、最も遅いケースは、6.1(mgO₂/L)であり、流速差約23(cm/s)で1.8(mgO₂/L)のDOの差が現れた。流速が速くなると、乱れ強度や剪断応力が増加し、溶存酸素濃度の増加が見られることから、生物膜付着が促進されたと考えられる。また、水面付近の乱れは、溶存酸素の再曝気を促進する効果もあると思われる。

(5)まとめ

本研究では、治水や利水目的で河川中に設置された人工構造物上に、時間の経過とともに水面付近などから形成される生物膜が、その構造物の材質や形状、設置条件により異なることに着目し。これらの条件を変化させることで、流れの可視化手法の開発および可視化実験を行った。ここでは、現存する河川構造物としての水制を取り上げ、様々な形状や材質について、また生物膜が形成される構造物表面の条件を変化させ、流れの影響を考察した。さらに、水路の河床にポーラスコンクリートを敷設し生物膜を付着させ、鉛直断面においてPTV法により流れの可視化を行ったところ、乱れ強度、レイノルズ応力は、流速の増加に伴い大きくなり、河床部において大きな値が得られること確認された。生物膜付着担体と汚濁水の接触面での剪断が大きくなると担体付着生物膜量の増加および硝化活性が高まることが示された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計13件)

- ① 門田章宏, 小島英司, 鈴木幸一, 各種水制形状に起因する平均流構造および組織的流れ構造, 水工学論文集, 査読有, 第54巻, 2010, 937-942
- ② Akihiro Kadota and Koichi Suzuki, Experimental study on mean and coherent flow structures caused by T-type and L-type groynes, Proc. of IAHR-APD, 査読有, vol. 17, 2010 Conference, USB
- ③ 門田章宏, 小島英二, 新家研蔵, 鈴木幸一, 単独水制下流部に発生する大規模組織渦の瞬間的移流構造に関する研究, 水工学論文集, 査読有, 第52巻, 2008, 727-732

- ④ 門田章宏, 新家研蔵, 鈴木幸一, 微生物膜形成場としてのコンクリート表面場の流れの可視化に関する研究, 土木学会第63回年次学術講演会概要集, 査読無, 第63巻, 2008, 433-434
- ⑤ Kadota, A., Kojima, E., Shinya, K. & Suzuki, K., Instantaneous-Advective Structures of Large Scale Coherent Vortices Around A Single Groyne, Proc of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS, 査読有, vol.16, 2008, 1137-1143
- ⑥ 門田章宏, 鈴木幸一, 単独水制周辺部の浅水流可視化実験と組織的乱流変動場の移流構造に関する解析, 可視化情報学会論文集, 査読有, Vol.28, No.1, 2008, 1-8
- ⑦ Kadota, A., Suzuki K., Rummel, A. C., Weitbrecht, V., Jirka, G. H., Shallow Flow Visualization and coherent structures around a single groyne, Proceedings of the XXXII of Congress of the International Association of Hydraulic Engineering and Research - IAHR, 査読有, 2007, CD-ROM

6. 研究組織

(1)研究代表者

門田章宏 (KADOTA AKIHIRO)
愛媛大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：80294784

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

()

研究者番号：